

УДК 664.87 : 004

*М. Г. ЗІНЧЕНКО, Е. Д. ПОНОМАРЕНКО, М. А. МАНЖАЙ***ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСТРУЗІЙНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ СУХИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ З КРАХМАЛЕВМІСНОЇ СИРОВИНИ**

Показані основні напрямки розвитку екструзійних технологій у харчовій промисловості України – створення нових рецептур сухих харчових продуктів, розробка раціональних режимів їх виробництва. Наведено результати експериментів по оптимізації процесу екструдуювання збагаченої крахмалевмісної сировини у виробництві картопляних паличок. На підставі отриманих даних розроблено математичну модель, що адекватно описує вплив всіх значущих чинників екструзії на параметр оптимізації – питоми енерговитрати. Встановлено параметри технологічного режиму, що забезпечують мінімальні енергетичні витрати на виробництво екструдата.

Ключові слова: екструзія, крахмалевмісна сировина, оптимізація, факторний експеримент, енергоємність.

Показаны основные направления развития экструзионных технологий в пищевой промышленности Украины – создание новых рецептур сухих пищевых продуктов и разработка рациональных энергосберегающих режимов их производства. Приведены результаты экспериментов по оптимизации процесса экструдирования обогащенного крахмалсодержащего сырья в производстве картофельных палочек. На основании полученных данных разработана математическая модель, адекватно описывающая влияние всех значимых факторов экструзии на параметр оптимизации – удельные энергозатраты. Установлены параметры технологического режима, обеспечивающие минимальные энергетические затраты на производство экструдата.

Ключевые слова: экструзия, крахмалсодержащее сырье, оптимизация, факторный эксперимент, энергоёмкость.

The main directions of the development of extrusion technologies in the food industry of Ukraine are shown: the creation of new recipes for dry food products and the development of rational energy-saving production regimes. The results of experiments on optimizing the process of extruding enriched starch-containing raw materials in the production of potato sticks are presented. The specific energy consumption is mostly influenced by the initial humidity of the product, the least is the constructive parameter. On the basis of the data obtained, a mathematical model has been developed that adequately describes the influence of all significant extrusion factors on the optimization parameter – the specific energy consumption. The parameters of the technological regime are established, which ensure minimum energy costs for the production of the extrudate. The product obtained as a result of experiments, was studied on a set of indicators that characterize its consumer properties and food and value. Due to the addition to the raw material of skimmed milk extrudate has high protein content and important for the human body of a mineral – calcium, which characterizes its high nutritional value.

Keywords: extrusion, starch-containing raw materials, optimization, factor experiment, energy intensity.

Вступ. Однією з перспективних технологій отримання високоякісних харчових продуктів є екструзійна обробка сировини, що дозволяє отримувати легко засвоювані продукти, повністю готові до вживання. У процесі екструдуювання продукти збагачуються білками, вітамінами, мінеральними речовинами та іншими добавками, що підвищує їх біологічну і енергетичну цінність і робить корисними для різних вікових категорій споживача [1].

Інтерес до цієї технології обумовлений, по-перше, великим обсягом і різноманітністю вироблюваної продукції, по-друге, економічною ефективністю, обумовленою тим, що один екструдер може замінити цілий комплекс машин і механізмів, необхідних для виробництва екструдованих виробів.

Асортимент харчової продукції, що виробляється методом екструзії, включає більше 400 найменувань. У розвинених країнах Європи (Німеччина, Великобританія, Швейцарія) споживання «сухих сніданків» на душу населення становить приблизно 3 – 7 кг на рік. В Україні цей показник становить менше 1 кг, а асортимент обмежений, в основному, випуском куку-

рудзяних паличок [2].

Низький рівень споживання екструдованих продуктів в Україні обумовлений в першу чергу тим, що в переробних галузях промисловості екструдуювання є недостатньо вивченим процесом. Велика питома вага фізично та морально застарілого обладнання, недосконалість техніки і технології позначається на якості виробів, що випускаються, призводить до подорожчання продукції. Проте переробка сировини методом екструзії має хороші перспективи застосування у вітчизняній харчовій індустрії, і подальше вивчення цього процесу є дуже актуальним [3].

Перспективним напрямом в області вдосконалення екструзійних технологій є розробка нових рецептур вихідних сумішей із застосуванням не тільки найбільш поширеної на території України сировини (гречка, картопля та ін.), але і нетрадиційних її видів (овочевих напівфабрикатів, білкових збагачувачів), що забезпечує поліпшення споживчих властивостей, підвищення біологічної та харчової цінності продуктів харчування [4].

Одночасно найважливішим завданням є енерго-

та ресурсозбереження виробництва і зниження собівартості продукції, що випускається.

Таким чином, для більш широкого застосування екструзії в харчовій промисловості України необхідна розробка нових технологій і обладнання, нових рецептур модельних сумішей, раціональних режимів процесу.

Мета роботи. Завданням даного дослідження була оптимізація параметрів екструзування збагаченої крохмалевмісної сировини у виробництві сухих харчових продуктів, зокрема картопляних паличок, з метою енергозбереження та забезпечення необхідної якості продукту.

Аналіз публікацій по темі досліджень.

Є досить велика кількість досліджень, спрямованих на вивчення процесів екструзійної обробки крохмалевмісної рослинної сировини [5 – 7].

Крохмаль – найбільш значимий компонент сировини за харчовою цінністю і використанню в харчовій промисловості, важливе джерело енергії для людини. Одним з основних джерел крохмалю є картопля і продукти її переробки, зокрема картопляні пластівці, тому доцільно їх використовувати в процесах екструзування. Екструзійні картоплепродукти на ринку України відсутні, тому є потреба у розробленні технологій їх виробництва [3].

Для підвищення харчової цінності вироблених продуктів необхідно використовувати різні види додаткової сировини. Особливий інтерес як рецептурної добавки до картопляних пластівців представляє сухе знежирене молоко (СЗМ), яке дозволяє збагатити вихідний продукт тваринним білком і мінеральними речовинами та позитивно впливає на органолептичні показники готових виробів. Встановлено, що за смаковими властивостями і зовнішнім виглядом отриманих виробів доцільно внесення не більше 20 % СЗМ до маси крихти з картопляних пластівців. В іншому випадку екструдовані картопляні палички не володіють необхідними споживчими властивостями [4, 7].

Тому при проведенні досліджень використовували модельну суміш на основі картопляних пластівців і сухого знежиреного молока в кількості 15 %.

Постановка експерименту, результати та їх обговорення. Для вирішення поставленого в роботі завдання була проведена серія експериментів з метою визначення таких режимних параметрів роботи екструдера, які б у широкому діапазоні зміни вхідних параметрів забезпечували мінімум питомих енерговитрат на процес.

Експериментальні дослідження проводились на лабораторному одношнековому екструдері, що включає робочу камеру зі шнеком і матрицею, нагрівально-охолоджувальну систему, станину, регульований при-

від. Крім того, експериментальна установка включає в себе контрольно-вимірювальну апаратуру для вимірювання і регулювання температури обробки, тиску в предматричній зоні екструдера, частоти обертання робочого органу (шнека) і визначення витрати споживаної установкою енергії.

Для дослідження взаємодії різних факторів, що впливають на процес екструзії, ефективно використання методів статистичного моделювання [9, 10]. Отримані цими методами рівняння регресії відображають найбільш істотні зв'язки між вхідними та вихідними параметрами досліджуваної системи.

Для побудови статистичної математичної моделі та знаходження чисельних значень параметрів цієї моделі був проведений планований експеримент. Одним з найбільше поширених методів планування експерименту є повний факторний експеримент (ПФЕ) та його дробові репліки (ДФЕ), що дозволяють мінімізувати загальну кількість дослідів для розв'язання поставленої задачі з необхідною точністю і побудувати математичну модель досліджуваного процесу вигляду:

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_j + \sum_{\substack{j,u=1 \\ j \neq u}}^k b_{j,u} x_{j,u}, \quad (1)$$

де b_0 – вільний член рівняння, b_j – коефіцієнти при лінійних членах рівняння, $b_{j,u}$ – коефіцієнти при парних взаємодіях, x_j – фактори у безрозмірній системі координат (кодовані фактори), k – число факторів.

Планування експерименту та моделювання процесу проводилось в цілях визначення оптимального процесу екструзії.

В якості критерію, що є найбільш важливим показником для оцінки енергетичної ефективності процесу екструзії, було обрано y , кДж/кг – питомі енерговитрати на процес екструзії.

Сукупність факторів, що роблять істотний вплив на енергоємність процесу екструзії, та інтервали їх варіювання були визначені на основі аналізу літературних даних [6 – 8] і корегувались з урахуванням технічних характеристик використовуюваного екструдера:

$z_1 \in \{14;18\}$ – початкова вологість продукту, %;

$z_2 \in \{0,7;0,9\}$ – частота обертання шнека, об/с;

$z_3 \in \{0,153;0,23\}$ – живий переріз матриці (відношення діаметра вихідного отвору формуючого каналу до діаметру отвору на вході в матрицю);

$z_4 \in \{0,85;0,87\}$ – конструктивний параметр (відношення внутрішнього діаметра шнека до зовнішнього);

$z_5 \in \{5;7\}$ – тиск в передматричній зоні, МПа.

Інтервали варіювання факторів експерименту приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Межі зміни вхідних параметрів

Умови планування	z_1	z_2	z_3	z_4	z_5
Основний рівень	16	0,8	0,192	0,86	6
Інтервал варіювання	2	0,1	0,038	0,01	1
Верхній рівень	18	0,9	0,230	0,87	7
Нижній рівень	14	0,7	0,153	0,85	5

Для побудови математичної моделі було обрано дробовий факторий експеримент – чверть репліку від повного факторного експерименту першого порядку із генеруючими співвідношеннями $x_4 = x_2 \cdot x_3$ та $x_5 = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$. Це дало можливість провести експеримент при наявності п'яти факторів з кількістю дослідів $N = 2^{5-2} = 8$ та одержати математичний опис процесу у вигляді лінійного поліному для без розмірної системи координат:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5, \quad (2)$$

де x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 – кодовані фактори.

Порядок реалізації дослідів та їх результати представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – План проведення експерименту

Номер дослідів	кодовані фактори					у, кДж/кг	
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y_1	y_2
1	-1	-1	-1	+1	-1	0,40	0,42
2	-1	+1	-1	-1	+1	0,53	0,55
3	+1	-1	-1	+1	+1	0,32	0,34
4	1	+1	-1	-1	-1	0,29	0,31
5	-1	-1	+1	-1	+1	0,52	0,51
6	-1	+1	+1	+1	-1	0,548	0,552
7	+1	-1	+1	-1	-1	0,33	0,29
8	+1	+1	+1	+1	+1	0,43	0,45

Кожний дослід був повторений двічі (паралельні виміри). Отримані два набори значень параметра оптимізації $y_{1,1}, y_{1,2}, y_{1,8}; y_{2,1}, y_{2,2}, y_{2,8}$. Значення факторів у плані експерименту (матриці планування) наведені у кодованому вигляді. Значення «-1» для будь-якого фактора матриці планування означає, що даний фактор обирається на нижньому рівні, «+1» – на верхньому; y_1, y_2 – значення вихідного параметра у за результатами двох паралельних вимірювань.

В результаті статистичної обробки даних експерименту (табл. 2) було отримане рівняння регресії (математична модель), яке адекватно описує процес екструзії від впливу досліджуваних кодованих факторів:

$$y = 0,42438 - 0,07938x_1 + 0,03313x_2 + 0,02938x_3 + 0,0319x_5. \quad (3)$$

При обробці експериментальних даних були застосовані такі статистичні критерії: перевірка однорідності дисперсій – критерій Кохрена для рівня значущості $\alpha = 0,05$, кількості степенів вільності $f_1 = 1, f_2 = 8$, $G_{\text{таб}} = 0,6798$, $G_p = 0,431$; оцінка значущості коефіцієнтів рівняння регресії – критерій Стьюдента для рівня значущості $\alpha = 0,05$, кількості степенів вільності $f = 8$, $t_{\text{таб}} = 2,31$.

Адекватність рівняння регресії оцінювалась за критерієм Фішера для рівня значущості $\alpha = 0,05$, кількості степенів вільності $f_1 = 2, f_2 = 8$, $F_{\text{таб}} = 4,06$.

Дане рівняння адекватно представляє поведінку відгуку (питомі енерговитрати) в досліджуваній області факторів, тому що розраховане значення критерію Фішера менше критичного значення ($F_p = 3,041 < F_{\text{таб}} = 4,06$).

Згідно з критерієм Стьюдента фактор x_4 – конструктивний параметр (відношення внутрішнього діаметра шнека до зовнішнього) виявився незначимим по впливу на вихідний параметр у.

Аналіз отриманого рівняння регресії (3) показує, що найменш впливовим фактором на питомі енерговитрати є z_3 (живий переріз матриці), а найбільше впливає фактор z_1 (початкова вологість продукту, %), тому що абсолютна величина коефіцієнта, з яким фактор входить до рівняння (3) найбільша.

Слід зазначити, що в досліджуваній області зміни факторів зменшенню питомих енерговитрат на процес екструзії у сприяє збільшення початкової вологості продукту z_1 , зменшення частоти обертання шнека z_2 , живого перерізу матриці z_3 , та тиску в передматричній зоні z_5 .

Для системи реальних факторів рівняння регресії (3) було розкодовано і має вигляд:

$$y = 0,4547 - 0,03969z_1 + 0,03313z_2 + 0,773z_3 + 0,0319z_5. \quad (4)$$

На підставі отриманої математичної моделі (4) було проведено обчислювальний експеримент по вивченню залежності питомих енерговитрат від всіх значущих факторів. Результати представлені у графічному вигляді (рис. 1).

Отримане рівняння регресії дозволяє розрахувати значення параметра оптимізації у при всіх можливих комбінаціях значущих чинників процесу, а також використовувється для проведення оптимізації.

ковою добавкою, отримана інформація про вплив різних чинників на даний процес.

На питомі енерговитрати найбільше впливає початкова вологість продукту, найменше – живий переріз матриці.

Побудована математична модель процесу, що дозволяє розрахувати питомі енерговитрати при всіх можливих комбінаціях значущих чинників процесу.

Визначені параметри раціонального технологічного режиму виробництва картопляних паличок, які забезпечує отримання продукту з хорошими споживчими якостями при низьких питомих витратах енергії.

Список літератури

1. Сидоренко Т. А. Экструзионная технология пищевых текстуратов / Т. А. Сидоренко // Пищевая и перерабатывающая промышленность. – 2008. – № 1. – С. 563.
2. Мюсли по-українски – Режим доступу: <http://statuspress.com.ua/nisha/myusli-po-ukrainski.html>.
3. Мардар М. Р. Маркетинговая среда предприятий по производству сухих завтраков в Украине / [М. Р. Мардар, А. А. Макарь, Е. А. Голубёнок, А. И. Яновская] // Харчова наука і технологія. – 2014. – № 4 (29). – С. 14 – 18.
4. Шульга О. С. Розроблення технології екструзійних картоплепродуктів підвищеної харчової цінності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.18.01 «Зберігання і технологія переробки зерна, виготовлення зернових і хлібопекарських виробів та комбікормів» / О. С. Шульга. – К.: 2009. – 29 с.
5. Бурцев А. В. Современная техника и технология термopластической экструзии в производстве «сухих завтраков» / А. В. Бурцев, В. А. Грицик, Г. И. Касьянов. – Краснодар: Экоинвест, 2004. – 112 с.
6. Абрамов О. В. Экструдированные хрустящие палочки с различными добавками / О. В. Абрамов // Изв. ВУЗов. Пищ. технология. – 2006. – № 1. – С. 66 – 68.
7. Абрамов О. В. Исследование основных закономерностей процесса экструзии при производстве комбинированных продуктов питания / О. В. Абрамов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2007. – № 6. – С. 69 – 72.
8. Остриков А. Н. Экструзия в пищевой технологии / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. С. Рудометкин. – С.-Пб.: ГИОРД, 2004. – 288 с.
9. Остриков А. Н. Многофакторный статистический анализ процесса экструзии комбинированных картофелепродуктов, обогащенных белковыми добавками / А. Н. Остриков, Р. В. Ненахов, В. Н. Василенко // Вестник РАСХН. – 2001. – № 4. – С. 13 – 15.
10. Тovaжнянський Л. Л. Комп'ютерне моделювання у хімічній технології / [Л. Л. Тovaжнянський, Т. Г. Бабак., О. О. Голубкіна та ін.]. – Х.: НТУ «ХПІ», 2011. – 606 с.

References (transliterated)

1. Sidorenko T. A. *Ekstruzionnaya tekhnologiya pishchevykh teksturativ* [Extrusion technology of food textures]. Pishchevaya i pererabatyvayushchaya promyshlennost', Moscow, GNU TsNSKHB Rosselkhozakademii Publ., 2008, No 1, p. 563.
2. *Myusli po-ukrainski* [Muesli in Ukrainian]. Available at: <http://statuspress.com.ua/nisha/myusli-po-ukrainski.html>
3. Mardar M. R., Makar' A. A., Golubonkova Ye. A., Yanovskaya A. I. *Marketingovaya sreda predpriyatiy po proizvodstvu sukhikh zavtrakov v Ukraine* [Marketing environment of enterprises for the production of dry breakfasts in Ukraine]. *Kharchova nauka i tekhnologiya*, 2014, No 4 (29), pp. 14 – 18.
4. Shul'ha O. S. *Rozroblennya tekhnolohiyi ekstruziynykh kartopleproduktiv pidvyshchenoyi kharchovoyi tsinnosti avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekh. nauk: spets. 05.18.01 "Zberihannya i tekhnolohiya pererobky zerna, vyhotovlennya zernovykh i khlibopekars'kykh vyrobiv ta kombikormiv"* [Development of technology of extruded potatoes-ruders of high nutritional value. Author's abstract dis for obtaining degree of cand. tech. sciences: special 05.18.01 "Storage and technology of grain processing, making of grain and baking products and mixed fodders"]. Kyiv, 2009, 29 p.
5. Burtsev A. V., Gritskikh V. A., Kas'yanov G. I. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologiya termoplasticheskoy ekstruzii v proizvodstve "sukhikh zavtrakov"* [Modern equipment and technology of thermoplastic extrusion in the production of "dry breakfasts"]. Krasnodar, Ekoinvest Publ., 2004, 112 p.
6. Abramov O. V. *Ekstrudirovannyye khrustyashchiye palochki s razlichnymi dobavkami* [Extruded crispy sticks with various additives]. *Izv. VUZov. Pishch. Tekhnologiya*, 2006, No 1, pp 66 – 68.
7. Abramov O. V. *Issledovaniye osnovnykh zakonornostey protsessa ekstruzii pri proizvodstve kombinirovannykh produktov pitaniya* [Investigation of the main regularities of the extrusion process in the production of combined food products]. *Khreneniye i pererabotka sel'khozsyrya*, 2007, No 6, pp. 69 – 72.
8. Ostrikov A. N., Abramov O. V., Rudometkin A. S. *Ekstruziya v pishchevoy tekhnologii* [Extrusion in food technology]. Sankt-Peterburg., GIORD Publ., 2004, 288 p.
9. Ostrikov A. N., Nenakhov R. V., Vasilenko V. N. *Mnogofaktorny statisticheskiy analiz protsessa ekstruzii kombinirovannykh kartofeleproduktov, obogashchennykh belkovymi dobavkami* [Multifactor statistical analysis of the extrusion process of combined potato products rich in protein additives]. *Bulletin of the Russian Academy of Agricultural Sciences, Vestnik RASKHN Publ.*, 2001, No 4, pp. 13 – 15
10. Tovazhnyans'kyy L. L., Babak T. H., Holubkina O. O., Ponomarenko E. D., Sataryn A. V. *Komp'yuterne modelu-vannya u khimichniy tekhnolohiyi* [Computer modeling in chemical technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2011, 606 p.

Надійшла (received) 06.09.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Оптимізація екструзійного процесу отримання сухих харчових продуктів з крахмалевмісної сировини / М. Г. Зінченко, Є. Д. Пономаренко, М. А. Манжай // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 48 (1269). – С. 52 – 57. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0821.

Оптимизация экструзионного процесса получения сухих пищевых продуктов из крахмалосодержащего сырья // М. Г. Зинченко, Е. Д. Пономаренко, М. А. Манжай // Вісник НТУ «ХПІ». – Серія: Хімія,

хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 48 (1269). – С. 52 – 57. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0821.

Optimization of the extrusion process for obtaining dry food products from starch-containing raw materials / M.G. Zinchenko, E.D. Ponomarenko, M.A. Manzhay // Bulletin of NTU “KhPI”. – Series: Chemistry, Chemical Engineering and Ecology. – Kharkov: NTU “KhPI”. – 2017. – № 48 (1269). – P. 52 – 57. – Bibliogr.: 10 names. – ISSN 2079-0821.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зінченко Марія Георгіївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри хімічної техніки та промислової екології; тел.: +38 (067) 280-26-08; e-mail: mazinchen999@gmail.com.

Зинченко Мария Георгиевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры химической техники и промышленной экологии; тел.: +38 (067) 280-26-08; e-mail: mazinchen999@gmail.com.

Zinchenko Mariya Georgievna – Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Docent, National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, Professor at the Department Chemical engineering and industrial ecology; tel.: +38 (067) 280-26-08; e-mail: mazinchen999@gmail.com.

Пономаренко Євгенія Дмитрівна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Інтегрованих технологій, процесів і апаратів; тел.: +38 (068) 118-55-32; e-mail: yevgeniya.ponomarenko@gmail.com.

Пonomarenko Евгения Дмитриевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Интегрированных технологий, процессов и аппаратов; тел.: +38 (068) 118-55-32; e-mail: yevgeniya.ponomarenko@gmail.com.

Ponomarenko Evgenija Dmitrievna – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Associate Professor of integrated technologies, processes and apparatus; tel.: +38 (068) 118-55-32; e-mail: yevgeiya.ponomarenko@gmail.com

Манжай Марія Андріївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр; тел.: +38 (063) 731-89-62; e-mail: manzhay1993@mail.ru

Манжай Мария Андреевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», магистр; тел.: +38 (063) 731-89-62; e-mail: manzhay1993@mail.ru

Manzhay Mariya Andreevna – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, master; тел.: +38 (063) 731-89-62; e-mail: manzhay1993@mail.ru